

## ***Комунальне господарство міст***

---

УДК 622.691.4

М.І.БРАТАХ, канд. техн. наук, К.Ю.СКРИЛЬНИК, Д.Ф.ДОНСЬКИЙ,  
канд. техн. наук, М.Я.БУРОВА, О.П.ВАРАВІНА  
*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

### **ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТРУБОПРОВОДІВ, ЩО ТРАНСПОРТУЮТЬ ГАЗОРИДИННІ СУМІШІ**

На основі систематизації літературних джерел нормативної документації і патентного пошуку представлений алгоритм розрахунків параметрів гідравлічного стану трубопроводів, які транспортують багатофазові потоки, до складу яких можуть входити нафта, конденсат, вода, механічні домішки і газ. Представлений алгоритм дає можливість оцінювати перепади тиску на ділянках трубопроводів та зміну маси рідини у трубі відповідно циклу «стискання – розширення» газових шапок в перевальних точках системи.

На основе систематизации литературных источников, нормативной документации и патентного поиска представлен алгоритм расчета параметров гидравлического состояния трубопроводов, транспортирующих многофазовые потоки, в состав которых могут входит нефть, конденсат, вода, механические примеси и газ. Представленный алгоритм дает возможность оценить перепады давления на участках трубопроводов и изменения массы жидкости в трубе соответственно циклу «сжатия – расширения» газовых шапок в перевальных точках системы.

Based on systematic literature, regulatory documentation and patent search algorithm is presented for calculating the parameters of hydraulic condition of pipelines transporting multi-phase flows, which may contain oil, condensate, water, gas and mechanical impurities. The algorithm makes it possible to evaluate the pressure drop in the pipeline sections and the change in mass of the fluid in the pipe, respectively, the cycle of «compression – expansion» gas caps in the crossover points of the system.

*Ключові слова:* нормативна документація, багатофазове середовище, перевальні точки, алгоритм, параметри гідравлічного стану.

Більшість нафтопроводів, продуктопроводів, конденсатопроводів, що прокладено на промислових площах, працюють із неповним завантаженням (неповним заповненням порожнини трубопроводу рідинним продуктом), а отже частина трубопроводу буде заповнена газом.

Такі трубопроводи називають трубопроводами, що транспортують двофазове середовище. За умови потрапляння в порожнину трубопроводу води, окрім газової та рідинної вуглеводневої фази, з'являється третя фаза – водна, внаслідок чого активні корозійні та ерозійні процеси зношення внутрішньої поверхні трубопроводу призводять до появи ще однієї фази – твердих відкладів. Саме тому цей алгоритм спрямований на вирішення проблеми розрахунку параметрів гідравлічного стану трубопроводів, що транспортують багатофазове середовище.

На відміну від газопроводів, які вважаються рівнинними за умови

перепаду висот менше за 100 м між двома перевальними точками, для трубопроводів, що транспортують багатофазове середовище вплив рельєфу яскраво простежується навіть при перепаді висот менше за 10 м, при цьому виділяють три типи ділянок трасою трубопроводу:

- висхідні;
- низхідні;
- рівнинні.

Складність розрахунку обумовлюється відносним рухом фаз в газорідинному потоці відповідно до їх густини та в'язкості, тобто – ковзанням цих фаз одна відносно іншої. Вуглеводнева рідина та вода, як більш щільні складові суміші, займатимуть в рельєфному трубопроводі певний об'єм, формуючи залежно від швидкості потоку хвилову, розшаровану, пробкову або кільцеву структуру. Ця структура буде різнитися не лише в залежності від швидкості потоку (яку визначатиме завантаження трубопроводу), але і від типу ділянки, яку проходить газорідинний потік.

Згідно із дослідженнями УкрНДІгазу [1] вміст механічних домішок в газорідинному потоці не перевищує 2,5 %, що підтверджено відбором проб із порожнини діючих шлейфів свердловин та промислових трубопроводів, а отже найбільш щільною складовою суміші буде вода, яка в понижених місцях формуватиме малорухомі рідинні накопичення якогось нормального об'єму, що чинитимуть постійний гідравлічний опір рухові рідинногазової суміші.

Газ, що потрапляє в трубопровід як складова нестабільного продукту (нафто-водо-конденсатної суміші) і виділяється в умовах зниження тиску, займатиме, як більш легка складова суміші, верхню твірну трубопроводу, формуючи в перевальних точках трубопроводу газові мішки різного об'єму, що стискатимуться і розширюватимуться під впливом тиску, супроводжуючи роботу трубопроводу пульсацією тиску, серед яких дослідники виділяють:

- високочастотні мікропульсації;
- низькочастотні макропульсації.

Поява цих пульсацій тісно пов'язана із появою хвиль або пробок в структурі нерозривного газорідинного потоку. Залежно від структури течії газорідинного потоку ці види пульсацій відповідають даним таблиці, що представлена нижче.

В промислових умовах макропульсації притаманні або початковому етапу розробки нафтогазоконденсатоносних площ, або кінцевому етапу, коли не досягається повне завантаження трубопроводу та, відповідно, заплановані швидкості руху [2].

У трубопроводі великої довжини на різних за орієнтацією в прос-

торі ділянках, що його формують, структура руху потоку в певний момент часу є різною і лише на одній із ділянок визначальною для параметрів режиму роботи трубопроводу. Саме на цій ділянці в певний момент часу може відбутись або проходження потужної хвилі або перерозподіл мас рідини під дією газового мішка, що призведе:

- до зміни тиску в початковій і кінцевій точках трубопроводу;
- зміни кількості суміші, що надходитиме до насосного обладнання в кінцевій точці трубопроводу.

Більшість із досліджень, що стосуються руху газорідинного потоку, стосувались здебільше визначення його структури [3], основні форми прояву якої представлено в таблиці. Як нормативні документи, на кшталт ВСН 51-3, із інструкціями з гідравлічного розрахунку промислових трубопроводів для газорідинних сумішей [4, 5, 6], так і останні технічні рішення [7], пропонують визначати градієнт падіння тиску по кожній із досліджуваних ділянок.

Структурна форма потоку	Число Фруда	Тип пульсації	Характеристика пульсації	Характеристика режиму роботи
Розшарована з гладкою поверхнею розділу фаз	менше 0,01	пульсації відсутні	притаманна для низхідних ділянок трубопроводу, або рівнинних із наднизьким завантаженням із чітким розподілом газової і рідинної фаз	без значних коливань тиску в початковій та кінцевій точках трубопроводу
Розшарована хвильова	від 0,01 до 0,1	низько-частотна макропульсація	притаманна висхідним ділянкам системи, незначна амплітуда коливання тиску із низькою частотою повторення протягом періоду спостереження	незначне коливання тиску в початковій та кінцевій точках трубопроводу
Пробкова	від 0,1 до 40	низько-частотна макропульсація	притаманна перевальним точкам трубопроводів із незначною частотою, але великою амплітудою тиску, відбувається при продавлюванні рідини потоком газу та її залповим викидом під його дією	значні коливання тиску в початковій та кінцевій точках трубопроводів із надходженням різних мас рідини на кінцевий пункт приймання продукту (до насосного обладнання)
Кільцева плівкова	вище 40	високо-частотна мікропульсація	низька амплітуда коливань, притаманна для високошвидкісних потоків	коливання тиску в контрольних точках наднизькі і при збільшенні швидкості руху прагнуть до зникнення

Ці документи можливо використати лише для періоду проектування трубопровідної системи і режимів роботи насосів або компресорів або ж для отримання якоїсь величини кінцевого тиску, яка, на думку авторів, є оптимальною для даного гідравлічного стану системи. Представлені рішення в такому вигляді не дають змогу оцінити процеси перерозподілу мас рідини, амплітуду коливання робочого тиску, визначити місця утворення газових шапок і водних пробок в порожнині трубопроводу.

Зважаючи на лінійний розподіл тиску в трубопроводі, амплітуду пульсацій тиску, необхідні для розрахунку значення тиску в початковій та кінцевій точках слід обирати за даними одночасного вимірювання. А основним завданням цього алгоритму є визначення амплітуди пульсацій тиску відносно початкового значення та різниці мас рідини, що може надходити на приймання насосів, встановлених в кінцевій точці трубопроводу.

В основу алгоритму покладено розрахунок гідравлічних параметрів трубопроводів, що перекачують газорідинні суміші, представлений в ВСН 51-3, доповнений методиками УкрНДІгазу, що базуються на обробці теорій А.К. Галлямова і І.А. Чарного [8, 9] щодо визначення межі розділу скупчень рідини в понижених ділянках трубопроводу.

Спосіб передбачає реалізацію наступного алгоритму визначення параметрів гідравлічного стану трубопроводів, що транспортують багатофазове середовище.

1. Характеристика по різному орієнтованих ділянок в просторі, що складають еквівалентну трасу трубопроводу, кутів їх нахилу до горизонтальної поверхні і висот перевальних точок і найбільш понижених місць відповідно до повздовжнього плану-профілю рельєфного трубопроводу.

2. Побудова лінії зміни тиску в трубопроводі по перевальним точкам. Для визначення лінійних втрат тиску на низхідних та висхідних ділянках трубопроводу  $\Delta P / \Delta L$ , кожне із значень тиску проектується на перевальну точку на плані-профілі траси, із одночасним фіксуванням довжин дзеркала найщільнішої складової багатофазової суміші  $S$  в найбільш понижених місцях трубопроводу.

3. Обрання для кожної конкретної ділянки трубопроводу, відповідно до її орієнтації в просторі, за відомими формулами, структури (типу) руху рідинногазового потоку, фактичних коефіцієнтів гідравлічного опору і розрахункових втрат тиску.

4. Усереднення фактичного коефіцієнту гідроопору по довжині досліджуваних ділянок із певною орієнтацією в просторі:

$$\lambda_c^\phi = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{ci}^\phi \cdot l_i}{l_{екв}}, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість досліджуваних ділянок незалежно від їх орієнтації в просторі;  $\lambda_{ci}^\phi$  – фактичний коефіцієнт гідроопору кожної з ділянок;  $l_i$  – фактична довжина кожної з ділянок, м;  $l_{екв}$  – загальна довжина трубопроводу, м.

5. Розрахунок втрат тиску для дійсного гідравлічного стану трубопроводу:

$$\Delta P_{зідр} = 1,05 \cdot \lambda_c^\phi \cdot \frac{l_{екв}}{D} \cdot \frac{w_c^2 \cdot \rho_c}{2}, \quad (2)$$

де 1,05 – коефіцієнт збільшення фактичного гідроопору за рахунок місцевих опорів;  $D$  – діаметр ділянки трубопроводу, м;  $w_c = \frac{4Q_c}{\pi D^2}$  – швидкість рідинногазової суміші, м/с;  $\rho_c$  – густина багатозової суміші, кг/м<sup>3</sup>;

6 Усереднення значення початкового тиску за часом проведення досліджень.

$$P_{поч}^{сер} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{поч}^i}{m}, \quad (3)$$

де  $m$  – кількість замірів тиску протягом часу проведення досліджень.

7. Оцінка фактичної амплітуди тиску на початку ділянки та частоти коливань робочого тиску, як проміжку часу між двома піковими протилежними значеннями робочого тиску відносно усередненої величини:

$$\Delta P_{пульс} = \left| P_{поч}^i - P_{поч}^{сер} \right|, \quad (4)$$

де  $P_{поч}^i$  – фактичні величини тиску протягом часу проведення досліджень, Па.

8. Розраховують функцію критичного кута для маси рідини, що знаходиться у стані спокою і приводиться у збудження при зміні тиску, викликаній пульсацією газової шапки:

$$\Phi_1(\varphi_{кр}) = \frac{4\pi^2 \beta_{\kappa} w_c^2 (P + \Delta P_{пульс})}{zRTDg \cos \alpha \left( \rho_s - \frac{P + \Delta P_{пульс}}{zRT} \right)}, \quad (5)$$

де  $\beta_k = 1,045-1,1$  – коефіцієнт Коріоліса (поправочний коефіцієнт на нерівномірність розподілення швидкостей);  $P$  – тиск суміші на ділянці трубопроводу, Па;  $R$  – питома газова стала, Дж/кг·К;  $T$  – температура суміші на ділянці трубопроводу, К;  $\alpha$  – середньозважений кут нахилу висхідних ділянок трубопроводу до горизонтальної поверхні, рад;  $\rho_e$  – густина води, як найбільш щільної складової суміші, кг/м<sup>3</sup>.

Рух локалізованої в нижніх точках трубопроводу води за рахунок зміни тиску відбуватиметься при досягненні критичного значення половини центрального кута до дзеркала рідини. Рух відбуватиметься лише висхідною ділянкою трубопроводу.

9. За технічною характеристикою трубопроводу відповідно до позовжнього плану-профілю траси визначають зміну об'єму газової шапки та відповідну йому зміну довжини дзеркал рідини  $s$ , що рухатимуться у вигляді пробки при стисканні газової шапки

$$s_{\text{пульс}}^i = \frac{s_i \cdot P_{\text{поч}}^i}{P_{\text{поч}}^i + \Delta P_{\text{поч}}^i} . \quad (6)$$

10. Розраховуємо об'єми суміші, що займатиме вивільнений додатковий об'єм трубопроводу на приймання насосів

$$\Delta V^i = \frac{D^2}{4} (2\varphi_{\text{кр}} - \sin 2\varphi_{\text{кр}}) s_{\text{пульс}}^i \quad (7)$$

$$\Delta m_i = \Delta V^i \cdot \rho_c . \quad (8)$$

11. Розрахунок допустимої величини амплітуди пульсацій тиску, що відповідає циклу стиснення-розширення газового мішка без перерозподілу мас рідини:

$$\frac{[\Delta P_{\text{пульс}}]}{g \cdot \rho_c \cdot D} = 40 \cdot \beta (1 - \beta) Fr_c \cdot e^{-f} , \quad (9)$$

де

$$f = [0,067(1 - \beta) Fr_c]^3 ; \quad (10)$$

$\Delta P_{\text{пульс}}$  – амплітуда пульсацій тиску, Па;

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{b_c}{\Gamma_\phi - \Gamma_p} \cdot \frac{P_{\text{сеп}} \cdot T_0}{(1 - W_c) \Gamma_{\text{сеп}} \cdot P_0 \cdot z}} , \quad (11)$$

де  $b_c$  – коефіцієнт об'ємного розширення (усадки) суміші при збільшенні (зниженні) тиску в трубопроводі;  $G_\phi$  і  $G_p$  – газовий фактор фактичний і розчинний;  $W_c$  – обводненість суміші, долі одиниці;  $P_{сер}$  і  $P_0$  – середній тиск в трубопроводі та атмосферний, Па;  $T_{сер}$  і  $T_0$  – середня температура суміші в трубопроводі та при нормальних умовах, К;  $z$  – коефіцієнт стисливості газу.

12. Перевірка умови критичного зменшення газового мішка, що відповідає процесу перерозподілу мас рідини і звільнення додаткового об'єму в трубопроводі, що займається рідиною:

$$P_{пульс}^i > [\Delta P_{пульс}] . \quad (12)$$

13. У разі виконання умови об'єм рідини і відповідна зміна маси суміші на кінцевій ділянці трубопроводу відповідають залповому викиду:

$$\pm \frac{V_{кр}}{\tau} = \frac{D^2}{4} (2\varphi_{кр} - \sin 2\varphi_{кр}) s , \quad (13)$$

$$\pm \Delta m_{кр} = \frac{V_{кр}}{\tau} \rho_c , \quad (14)$$

де  $\tau$  – частота пульсацій, різниця між максимальним і мінімальним значенням робочого тиску відносно усередненого значення.

Перерозподіл мас рідини цього критичного об'єму називається залповим викидом рідини з пониженого місця (коліна трубопроводу) і носить періодичний, неусталений характер та залежить від пульсації робочого тиску, викликаній стискуванням – розширенням газової шапки в перевальних точках. Неусталеність або нестационарність процесу транспортування багатофазової суміші через порожнину трубопроводу розуміє під собою зміну основних параметрів гідравлічного стану як по довжині, так і в часі. Тому маса суміші, яка за час  $t$  буде надходити від початкової точки трубопроводу до його кінцевої точки при виконанні умов пульсації тиску та залпових викидів рідини відрізнятиметься на якусь величину  $\pm \Delta m_{кр}$ .

Технічним результатом застосування запропонованого технічного рішення є визначення потенційно-небезпечних ділянок трубопроводів, що транспортують багатофазове середовище, і експлуатація яких супроводжується аварійними надходженнями великих мас рідини, різкою зміною робочого тиску, що може призводити до аварійної зупинки обладнання, припинення процесу видобування вуглеводнів і забруднення навколишнього середовища. Крім того реалізація розроб-

леного алгоритму в програмному забезпеченні дає змогу зменшити часові ресурси на попередження та локалізації аварійних ситуацій, вчасно приймати рішення щодо запровадження комплексу заходів щодо підвищення ефективності роботи ділянок трубопроводів, розробити плани графіки відвантаження вуглеводної сировини на об'єктах видобування нафтогазопромислової продукції.

Спосіб визначення параметрів гідравлічного стану трубопроводів, що транспортують багатофазове середовище, може бути використаний у нафтогазовидобувній та нафтохімічній областях в процесі їх проектування та експлуатації для оцінки параметрів квазістаціонарного режиму експлуатації, попередження виникнення аварійних ситуацій, створення відомчих нормативних документів, реалізації розроблених алгоритмів в програмному забезпеченні.

1. Братах М.І. Спосіб визначення об'єму забруднень в порожнині газопроводів, що транспортують газ власного видобутку / М.І. Братах // Проблеми нафтогазової промисловості: зб. наук. праць. – К.: ДП Науканафтогаз, 2007. – Вип. 5. – С. 628 - 634.

2. Лутошкин Г.С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды / Г.С. Лутошкин. – М.: Недра, 1977. – 192 с.

3. Клапчук О.В. Экспериментальные исследования структуры турбулентного потока в гладких и шероховатых трубах / О.В. Клапчук, В.П. Славинский // «Разработка месторождений, промышленная и заводская обработка газа, транспорт газа». – М., 1974. – Вып. 1. Ч. 2. – С. 48-61.

4. Инструкция по гидравлическому расчету промысловых трубопроводов для газожидкостных смесей. – М.: ВНИИГАЗ, 1980. – 22 с.

5. Ведомственные строительные нормы. Проектирование промысловых стальных трубопроводов: ВСН 51-3-85. – М.: Мингазпром, 1985. – 40 с.

6. Калашников О.В. Расчетные и действительные перепады давления при двухфазном транспорте нефти и газа / О.В. Калашников // Экотехнологии и ресурсосбережение: науч.-техн. журнал НАН Украины. – К., 2001. – Вып. 1. – С. 9-13.

7. Пат. UA 36414 U, МПК(2006) F17D. Спосіб визначення гідравлічного стану газопроводів, які транспортують газорідні суміші / Дячук В.В., Капцов І.І., Стецюк С.М., Сушко Г.М., Світлицький С.М.; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20.

8. Чарный И.А. Влияние рельефа местности и неподвижных включений жидкости или газа на пропускную способность трубопроводов / И.А. Чарный // Нефтяное хозяйство. – 1965. – № 6. – С. 51-55.

9. Галлямов А.К. Вытеснение высоковязких нефтей и нефтепродуктов в трубопроводах/ А.К. Галлямов // Гидродинамика и фильтрация однофазных и многофазных потоков: труды МИНХиГП. – М.: Недра, 1972. – Вып. 101. – С. 102-106.

*Отримано 22.10.2013*